Experimentelle Untersuchungen über Haftfestigkeit von Stiftverankerungen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Bayerischen Ludwigs-Maximilians-Universität zu
München

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Herbert Knöbl
Zahnarzt in München.

München 1934

Buchdruckerei L. Mößl, Inh. Fritz & Joseph Voglrieder, München 2 SW, Hermann Linggstr. 12

Experimentelle Untersuchungen über Haftfestigkeit von Stiftverankerungen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Bayerischen Ludwigs-Maximilians-Universität zu
München

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Herbert Knöbl
Zahnarzt in München.

München 1934

Buchdruckerei L. Mößl, Inh. Fritz & Joseph Voglrieder, München 2 SW, Hermann Linggstr. 1

Referent:

Privatdozent Dr. med. et Dr. med. dent. Erwin Reichenbach.

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Mai 1934.

Wer die Fachliteratur der letzten Jahre durchblättert, der wird unschwer feststellen können, daß es recht laut geworden ist um das Thema Stiftverankerungen. Eine ganze Reihe neuer Systeme wurde ausgeklügelt, von Freunden gelobt und von Gegnern wieder verworfen. Aus diesem Grunde ist es vielleicht nicht unangebracht, sich einmal theoretisch mit dieser Materie auseinanderzusetzen. Mir jedenfalls erscheinen Untersuchungen auch dann nicht zwecklos, wenn sie uns auch nur bestätigen, was wir längst gefühlsmäßig für richtig hielten. So soll denn nachfolgend der Versuch unternommen werden, einige Probleme der Stiftverankerungen zu untersuchen und wo Zusammenhänge nicht zu erklären sind, sollen sie wenigstens angeschnitten werden.

Meine Untersuchungen bauen sich auf einer Reihe von Versuchen auf. Zu den Modellen möchte ich einige Bemerkungen machen. Als Material für die Stifte wurde Silberstahl in handelsüblicher gezogener Form verwendet, bearbeitete Stellen wurden doppelt geschlichtet. Zu Stahl habe ich gegriffen schon einmal wegen der Billigkeit, ferner aber auch um ein Material immer gleicher technischer Eigenschaften zu haben. Dem Einwand, daß Stahl für Stifte praktisch in der Zahnheilkunde selten verwendet wird, kann entgegengehalten werden, daß die Versuchszahlen ja auch nur Vergleichszahlen sein sollen und keine absolute Gültigkeit haben. Der gleiche Grund veranlaßte mich auch statt Wurzeln extrahierter Zähne Scheiben aus Galalith zu verwenden. Ursprünglich gebrauchte Zahnwurzeln zeigten hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften ganz bedeutende Schwankungen, sodaß sie als Versuchsobjekte ausscheiden mußten. Ueberdies ließen sich aus Galalith bezüglich der Form bequemere Versuchskörper gestalten. Des näheren sollen die Versuchsanordnungen jeweils von Fall zu Fall besprochen werden.

Auf die sogenannten neuen Methoden, besonders deren technologische Seite soll nicht eingegangen werden. Ich will mich vielmehr nur mit den Elementen der Stiftverankerung befassen, das ist mit dem Stift, seinem Bette in der Wurzel und der Zementzwischenschicht. Das schließt selbstverständlich nicht aus, daß die „neuen Methoden" wo sie an diese Grundelemente herangreifen mit in den Kreis der Betrachtungen gezogen werden.

Es mag auffallen, daß ich nicht auch über Torsionsfestigkeit einzementierter Stifte spreche. Diese ist jedoch so gering, daß ich jede Stiftverankerung, die einen Stift im Vertrauen auf die Haltbarkeit des Zementes zur Aufnahme eines Drehmomentes heranziehen will, als Fehlkonstruktion ansprechen muß. Fehlkonstruktionen zu untersuchen soll aber nicht Zweck der vorliegenden Arbeit sein.

I. Einfluß der Stiftlänge auf den Halt.

Wollten wir das Haftvermögen eines Stiftes in seinem Bette formelmäßig ausdrücken, so würden wir schreiben

$$H = h \cdot F \qquad \text{(Gl. 1)}$$

Darin bedeutet:

H = das gesamte Haftvermögen
h = das auf die Flächeneinheit bezogene Haftvermögen
F = die Haftfläche, ausgedrückt in Flächeneinheiten.

So einleuchtend diese Formel auch ist, ebenso falsch ist es, daraus rechnungsmäßig irgendwelche Folgerungen zu ziehen. Sie stellt nämlich eine Zustandsgleichung dar, d. h. sie stimmt für jeden einzelnen Zustand, sobald wir aber eine Größe verändern, verändern sich die anderen Größen mit und zwar nicht äquivalent. Verdopple ich beispielsweise die Haftfläche F, so wird H nicht doppelt so groß, da auch h nicht konstant bleibt. Es ist also nicht nur die Größe der Haftfläche sondern auch ihre Lage von Einfluß, mit andern Worten F ist nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ zu bewerten.

Versuchsanordnung: Stifte vom Durchmesser 2 mm werden in Galalithscheiben verschiedener Stärke unter sonst gleichen Bedingungen einzementiert und zwar so, daß die einzementierte Stiftlänge der Scheibenstärke gleich ist. Auf einer Materialprüfmaschine wird nach Erhärtung des Zementes die zur Trennung notwendige Kraft gemessen.

Tabelle 1.

Länge mm	Haft kg	Haftfläche mm^2	spez. Haft kg/mm^2
5,0	17,8	31,4	0,567
7,5	24,2	47,1	0,513
10,0	31,1	62,8	0,494
12,5	35,3	78,5	0,451
15,0	40,7	94,2	0,432
20,0	50,5	125,6	0,420

Die in Tabelle 1 angegebenen Werte stellen das Mittel aus 6 Ablesungen dar. Es zeigt sich also, daß das Haftvermögen nicht proportional der Stiftlänge zunimmt. Noch klarer fällt dies in die Augen, wenn wir die Ergebnisse in einem Schaubild zur Darstellung bringen, worin das spezifische Haftvermögen als Koordinate und die Stiftlänge als Abszisse aufgetragen wird. (Abb. 1).

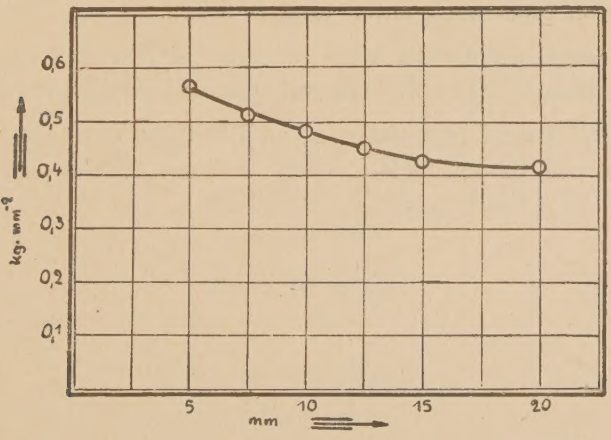

Abb. 1

Worin haben wir den Grund für diese Erscheinung zu suchen? Die Gesetze der einfachen Mechanik, bei der die Körper als durchaus unveränderlich oder starr angesehen werden, können uns hier keine Erklärung geben. Wir müssen vielmehr auf die Gestaltänderungen, wenn sie auch noch so klein sein mögen, Rücksicht nehmen, um zu einer Lösung zu gelangen.

Das Hook'sche Gesetz sagt aus, daß bei festen Körpern innerhalb ziemlich weiter Grenzen die Längenänderungen den Belastungen proportional sei (Ut tensio sic vis — 1678). So muß also auch bei kleinen und kleinsten Kräften bereits eine Dehnung statthaben, wobei die Frage belanglos ist, ob sie unendlich klein bleibt oder meßbare Größe erreicht. Auf unseren Fall angewandt wird also ein einzementierter Stift beim Versuch ihn auszuziehen zunächst eine der aufgewendeten Kraft verhältnisgleiche Dehnung erleiden. Diese Längung muß an der Stelle, an der die Kraft eingeleitet wird, also an der Oberfläche den vollen Wert haben, während sie nach der Tiefe zu abnimmt und zwar bis zum Wert Null.

Wie sich diese Dehnung des Stiftes auf den Halt auswirkt ist leicht zu erkennen. Die Zementelemente, wir wollen sie Fasern heißen, die nahe der Oberfläche liegen, werden stärker gedehnt als die tieferen. Nun verträgt aber Zement eine nur sehr kleine Dehnung, es muß also ein Bruch der übermäßig gedehnten Fasern nahe der Oberfläche eintreten. Der Bruch zwischen Zement und Stift erfolgt also nicht über die ganze Haftfläche gleichmäßig sondern von oben nach unten fortschreitend.

Wie die Dehnung der Zementfasern aber wiederum mit der Stiftlängendehnung zusammenhängt geht aus Abbildung 2 hervor.

Die gedehnte Zementfaser z' ist die Seite eines rechtwinkeligen Dreiecks, dessen andere Seiten $\triangle l$ und z. Der eingeschlossene Winkel α charakterisiert das Dreieck.

$$\sin \alpha = \frac{\triangle l}{z'} \qquad \text{(Gl. 2)}$$

oder

$$\cos \alpha = \frac{z}{z'} \qquad \text{(Gl. 3)}$$

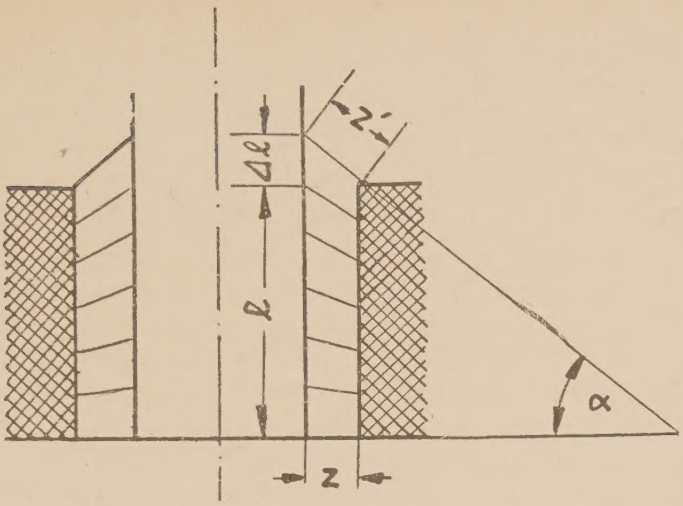

Abb. 2

Der cos stellt einen Bruch dar, ist also kleiner als 1, sobald $\triangle l$ positiv ist, was bei Dehnung ja auch der Fall ist. Durch Umstellung obiger Formeln ergibt sich $z' = \frac{z}{\cos \alpha}$; z' muß somit größer als z sein, was wir ja ohnedies schon so erkannten. Wählen wir nun $\triangle l$ so groß, daß die Zementfaser reißt, so gibt uns z' ein Maß für die Dehnungsfähigkeit des Zementes; z' ist dann die Reißlänge und α der Zerreißwinkel.

Wir haben nun noch darüber zu sprechen, wie groß eigentlich die Stiftdehnung ist. Die Formel dafür lautet:

$$\triangle l = \frac{P \cdot l}{E \cdot F} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

$\triangle l$ = Längenzuwachs
l = Länge des Stabes
P = Kraft
F = Stabquerschnitt
E = Elastizitätsmodul.

Setzen wir in dieser Formel die Größen P, F und E gleich constans, so ergibt sich ohne weiteres wieder, daß $\angle| l$ direkt proportional mit l ist. Mit andern Worten, je länger wir den einzementierten Stift wählen, um so stärker ist seine Dehnung, um so stärker muß aber auch die Spannung der oberen Randfaser sein. Damit haben wir aber bewiesen, daß mit zunehmender Stiftlänge der Bruch der Randfaser eher einsetzen muß.

Aus den vorangegangenen Betrachtungen haben wir ersehen, daß der Stift eine Längsdehnung erfährt. Soll das Volumen eines in der Hauptsache herausgeschnittenen unendlich kleinen Parallelepipeds aber annähernd gleich sein, so muß eine Querkontraktion erfolgen, sodaß ein Körper entsteht, wie er in Abbildung 3 punktiert eingezeichnet ist. Denken wir uns an dieses Parallelepiped die Zementfaser angeheftet, so ergibt sich wie aus Abbildung 4 ersichtlich eine weitere zusätzliche Dehnung. Die endgültige Dehnung nach der Querkontraktion $\angle| q$ ist punktiert eingezeichnet.

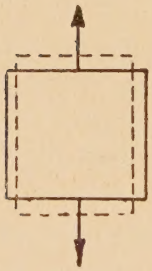

Abb. 3

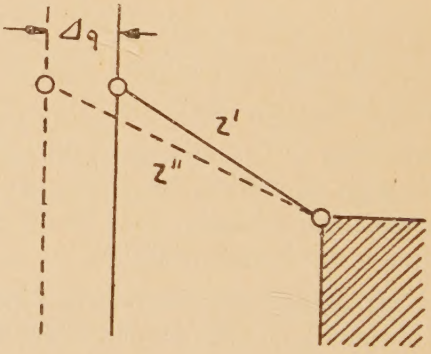

Abb. 4

Die Größe der Querkontraktion wird gewöhnlich dargestellt in Abhängigkeit von der Längsdehnung. Das Verhältnis Längsdehnung : Querkontraktion ist eine vom Material abhängige konstante unbenannte Zahl, die Poisson'sche Konstante, sie wurde für Stahl zu $\frac{l}{m} = 0{,}3$ oder $m = 3$ ermittelt. Wollten wir nun die Querkontraktion rechnerisch erfassen, so dürften wir natürlich nur die Hälfte des Wertes für eine Zementfaser in Ansatz bringen,

da die Kontraktion ja allseitig gleich erfolgt. Wir sehen, daß dieser Wert gleich 0,15 × Längsdehnung außerordentlich klein ausfällt. z'' ist also nicht wesentlich größer als z'. Die Differenz z'—z'' ist jedenfalls kleiner als $\triangle$ q.

Mit der Einführung der Querkontraktion verändern wir streng genommen auch unseren Zerreißwinkel α, wie aus Abbildung 4 ohne weiteres hervorgeht, doch ist diese Winkelkorrektur bei den ohnehin sehr kleinen Winkeln ruhig zu vernachlässigen.

Welchen Einfluß die Querkontraktion auf die Haftfestigkeit tatsächlich ausübt, können wir auf indirektem Wege feststellen.

Versuchsanordnung: Wie vorher. Stifte von 2 mm Stärke werden in Galalithscheiben verschiedener Stärke einzementiert. Diesmal werden jedoch die Stifte nicht ausgezogen, sondern ausgepreßt.

Tabelle 2.

Länge mm	Druck			Zug	
	Haft kg	Haftfläche mm²	spez. Haft kg/mm²	Haft kg	spez. Haft kg/mm²
5,0	18,3	31,4	0,581	17,8	0,567
7,5	25,9	47,1	0,550	24,2	0,513
10,0	32,6	62,8	0,518	31,1	0,494
12,5	38,8	78,5	0,494	35,3	0,451
15,0	44,8	94,2	0,476	40,7	0,432
20,0	58,6	125,6	0,466	50,5	0,420

Hatten wir bei unserer ersten Versuchsanordnung infolge des Zuges eine Einschnürung der Stifte erhalten, so bekommen wir jetzt eine Querschnittsvergrößerung also eine Stauchung der Stifte. Wie ein Vergleich der Ergebnisse mit Tabelle 1, die hier der einfacheren Vergleichsmöglichkeit halber nochmal mit aufgeführt ist, ohne weiteres lehrt, liegt sowohl das Haftvermögen als auch der spezifische Gleitwiderstand bei Druck höher als bei Zug. Ebenso wie aber die Querkontraktion bei Zug das Haftvermögen herab-

setzt, erhöht die Querdehnung den Gleitwiderstand. Die Differenz erhöhte Haft weniger herabgesetzte Haft haben wir aus den beiden Versuchsreihen gewonnen. Nun ist nur noch zu überlegen, wie stark jede dieser beiden Größen am Zustandekommen dieser Differenz beteiligt ist; dazu vergleichen wir die Minimalwerte mit den Maximalwerten jeder Reihe. Dabei zeigt sich, daß das spezifische Haftvermögen bei Druck von 0,581 bis 0,466 kg/mm² innerhalb der Versuchsreihe abnimmt, die Differenz ist also somit 0,115 kg/mm². Bei Zug betrug die entsprechende Differenz 0,567—0,420 = 0,147 kg/mm². Damit scheint die Behauptung gerechtfertigt, daß die Querschnittserweiterung auf den Halt geringeren Einfluß hat als die Querkontraktion. Somit müssen wir also mehr als die Hälfte der Differenz Haftvermögen bei Druck weniger Haftvermögen bei Zug auf das Konto der Querkontraktion buchen.

Beispiel: Stiftlänge 20 mm.

Haftvermögen Druck	58,6 kg
Haftvermögen Zug	50,5 kg
Differenz	8,1 kg

Auf Querkontraktion entfallen davon mehr als 4 kg = 8 % des Haftvermögens. Mit andern Worten, würde keine Querkontraktion erfolgen, so wäre das Haftvermögen des 20 mm langen Stiftes um rund 10 % höher.

Im Vorangegangenen wird ständig die Dehnung des Stiftes als Ausgangspunkt der Betrachtungen gewählt, es bleibt also noch der Beweis zu erbringen, daß eine Dehnung tatsächlich eintritt.

Versuchsanordnung: Ein Stift vom Durchmesser 2 mm und 10 mm Länge, wie wir ihn schon bisher verwandten, wird in die Galalithhülse einzementiert und auf der Prüfmaschine ausgezogen. Nur ist diesmal der Stift vergütet.

Nach Gleichung 4 ist die Längung indirekt proportional dem Elastizitätsmodul. Wenn wir nun den Stift vergüten, so erhöhen wir den Elastizitätsmodul, um die Größe dieser Erhöhung wollen wir uns nicht weiter kümmern. Wenn unsere Annahme einer Stiftlängung richtig ist, müssen wir eine größere Kraft aufwenden

um diesen unelastischen Stift auszuziehen. Der Versuch bestätigt das:

Stift vergütet	31,9 kg
Stift unvergütet	31,1 kg
Differenz	0,8 kg

Wenn die Zunahme von 0,8 kg = 2,5 % auch eine geringe ist, so genügt sie doch um die Tatsache einer Stiftlängung zu belegen.

Wenn ich eingangs behauptet habe, daß das spezifische Haftvermögen je nach der Lage des zugehörigen Flächenelements verschieden ist, so ist dies wohl hinreichend bewiesen. Aus dem Gesagten läßt sich auch unschwer erkennen, daß der spezifische Gleitwiderstand in gesetzmäßiger Abhängigkeit von der Stiftlänge steht. Eine Gesetzmäßigkeit muß sich aber auch in einer Formel ausdrücken lassen.

Bedeutet x die Länge des einzementierten Stiftes in mm und P_x die zugehörige Haftkraft in kg, so kann man die durch Versuch gefundene Haftkraft der Tafel 1 mit ziemlicher Genauigkeit ausdrücken durch die Formel

$$P_x = 5{,}34 \cdot x^{3/4} \qquad \text{(Gl. 5)}$$

Der Faktor 5,34 ist aus den Versuchsergebnissen errechnet, er muß also alle Faktoren des Versuches wie Zementklebfähigkeit, Stiftmaterialkonstante usw. einschließen.

Wenn man die Einzementierungslänge x um dx vergrößert, so wächst P_x um dP_x, das durch die an dieser Stelle bestehende Haftfähigkeit h_x aufgenommen wird. (Abb. 5).

$$dP_x = h_x \cdot d \cdot \pi \cdot d_x$$

$$\frac{dP_x}{d_x} = \frac{3}{4} \cdot 5{,}34 \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{x}} = h_x \cdot d \cdot \pi$$

$$h_x = \frac{3}{4} \cdot \frac{5{,}34}{d \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{x}} \qquad \text{(Gl. 6)}$$

Mit dieser Formel läßt sich die spezifische Haftfähigkeit für jedes Flächenelementchen im Augenblick des Gleitens ermitteln. Näher darauf einzugehen dürfte sich aber erübrigen.

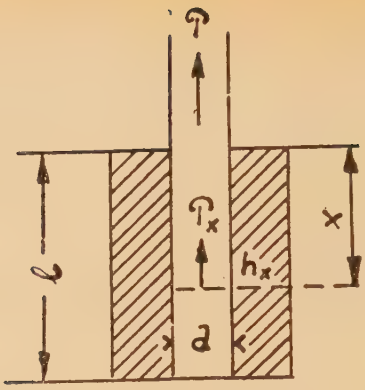

Abb. 5

Zusammenfassung: Es besteht eine gesetzmäßige Abhängigkeit zwischen einzementierter Stiftlänge und dem Trennungswiderstand. Stiftdehnung und Stifteinschnürung bzw. Stiftstauchung spielen bei der Erklärung eine Rolle. Für die Berechnung des Haftvermögens wird eine Formel angegeben.

II. Einfluß des Stiftdurchmessers auf den Halt.

Wir haben im letzten Kapitel die Abhängigkeit des Haltes von der Dehnung des Stiftes als Funktion der Stiftlänge betrachtet. Die Dehnung ist aber nicht nur von der Länge, sondern in viel stärkerem Maße vom Durchmesser des Stiftes abhängig. Schauen wir uns nochmals die Gleichung 4 an, die lautet:

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{E \cdot F}$$

so erkennen wir, daß Δl direkt proportional ist l und indirekt proportional F. Dabei ist aber l eine lineare Größe ausgedrückt in mm, während F als Fläche sich dokumentiert mit der Dimension mm^2. Bei einer Vergrößerung des Stiftdurchmessers steigt somit F im Quadrat.

Ueber das Haftvermögen von Stiften verschiedener Stärke hat Dr. J. Spanner, der Degussa Pforzheim, Versuche angestellt und

in der Deutschen Zahnärztlichen Wochenschrift 1930 veröffentlicht in einem Artikel „Klebrigkeit und Haftfestigkeit von Zinkphosphatzement".

Versuchsanordnung bei Spanner: Stifte verschiedener Durchmesser wurden in Hartgummikörper einzementiert. Auf einer Materialprüfmaschine wurde der Trennungswiderstand ermittelt.

In nachstehender Tabelle greife ich eine Versuchsreihe aus Spanners Veröffentlichung heraus.

Tabelle 3

Durchmesser mm	Haft kg	Haftfläche mm²	spez. Haft kg/mm²
0,7	7,9	17,6	0,449
1,3	16,5	32,6	0,504
1,5	21,0	36,8	0,571
1,8	23,6	45,3	0,521
2,0	25,5	50,3	0,507
2,7	34,0	67,9	0,501

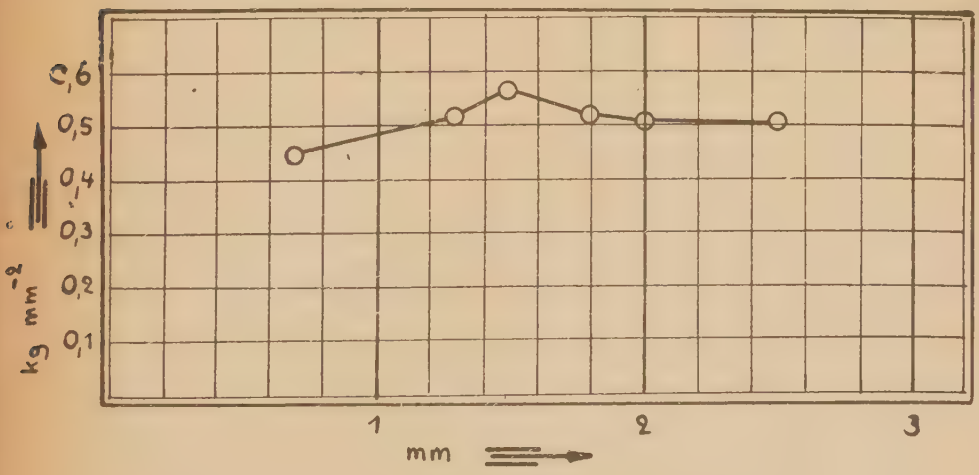

Abb. 6

Wie aus Tabelle und Schaubild 6 hervorgeht, haben wir zwei Abschnitte zu unterscheiden, zuerst einen bei dem das spezifische Haftvermögen ansteigt, während es im anderen wieder abfällt.

Das Anwachsen des spezifischen Haftvermögens mit zunehmender Stiftstärke entspricht durchaus unseren Erwartungen. Eine Vergrößerung des Stiftdurchmessers bedingt eine Abnahme der Längendehnung, der Winkel α wird also kleiner ganz analog unseren Betrachtungen im 1. Kapitel. Spanner meint es wäre bei den Stiften mit einem Durchmesser kleiner als 1,5 mm vielleicht schon die Fließgrenze des Materials überschritten. Vermutlich will Spanner damit nur ausdrücken, daß eine Dehnung eintritt, denn die Fließgrenze, das ist die Spannung bei der eine besonders rasche und bleibende Dehnung eintritt, ist bei weitem nicht erreicht wie eine kleine Rechnung ohne weiteres zeigt. Bei einem Stiftdurchmesser von 0,7 mm, das ist der ungünstigste Fall, haben wir eine Haftfähigkeit von 7,9 kg. Das ergibt 20,6 kg/mm² oder 2060 kg/cm² Zug. Nach Hütte erster Band 5. Abschnitt Tafel 22 liegt aber die Fließgrenze zusammenfallend mit der Proportionalitätsgrenze erst bei 4200 kg/cm².

Neuartig und paradox erscheint jedoch zunächst der absteigende Ast des Kurvenverlaufes in Abbildung 5. Spanner schreibt dazu: „Bei sehr dicken Stiften mißt man verhältnismäßig geringe Festigkeitswerte, weil man bei diesen Stiften entsprechend mehr Zement benutzt und weil bei einer größeren Zementmenge, wie sie ja in der Praxis nicht vorkommt, Volumenänderungen des Zementes beim Abbinden und beim Lagern sich ungünstig auswirken.“ Wenngleich ich selbst mit allzugroßen Versuchmodellen, die ich ursprünglich verwenden wollte, sie waren mit 25 fach vergrößerten Haftflächen gegenüber den in der Praxis vorkommenden Fällen, wahrscheinlich der technischen Schwierigkeit wegen eine gleichmäßige Zementschicht einzubringen, gescheitert bin, kann ich mir doch die Erklärung Spanners nicht zu eigen machen. Fehler in der Zementierung können sich meiner Ansicht nach nur in starker Streuung der Versuchswerte äußern, nicht aber in einem offensichtlich gesetzmäßigen, wenn auch unerwarteten Ablauf. Wir brauchen auch gar nicht nach einer neuen Ursache Ausschau halten, da uns ganz im Rahmen unserer bisherigen Betrachtungen eine Erklärung zur Verfügung steht.

Haben wir bisher der Einfachheit halber angenommen, daß die Wurzel starr sei und der Stift sich dehne, so kann bei dickeren Stiften der Stift als starr und die Wurzel als deformierbar betrachtet werden. Es findet also der gleiche Vorgang statt wie wir ihn schon kennen lernten, nämlich eine teilweise Verschiebung von Stiftelementen gegenüber den zugehörigen Wurzelelementen. Das bedeutet aber wieder eine Herabminderung der spezifischen Haftfähigkeit. In Wirklichkeit ist natürlich weder die Wurzel noch der Stift jemals starr, sondern beide Elemente unterliegen in jedem Falle einer Dehnung. Mit zunehmender Stiftstärke nimmt indes die Stiftdehnung ab, während die Wurzeldehnung bedingt durch die zugehörige größere Trennungskraft zunimmt. Schematisch zeigt dies Abbildung 7.

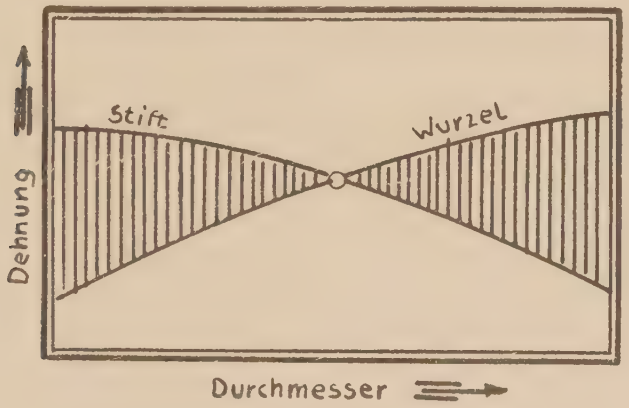

Abb. 7

Der Schnittpunkt der beiden Kurven sagt uns, daß bei diesem Stiftdurchmesser Stiftdehnung und Wurzeldehnung gleich sind. Hier tritt also keine gegenseitige Verschiebung ein, somit müssen wir ein Optimum der Haftfähigkeit haben. Während wir die Kurve der Stiftdehnung noch einigermaßen rechnerisch erfassen können, ist dies bei der Dehnung der Wurzel nicht mehr möglich; wir können von ihr nur behaupten, daß sie ansteigen muß und die Stiftdehnungskurve an irgend einem Punkte schneidet. Dies ist bei

der Spanner'schen Versuchsreihe bei einem Stiftdurchmesser von 1,5 mm der Fall. Die in Abbildung 7 schraffiert eingezeichnete Fläche ergibt ein Maß der gegenseitigen Verschiebung.

Zusammenfassung: An Hand der Versuchsergebnisse von J. Spanner wird gezeigt, daß mit zunehmender Stiftdicke zunächst das spezifische Haftvermögen zunimmt. Von einem gewissen Durchmesser ab nimmt jedoch der spezifische Gleitwiderstand wieder ab. In der elastischen Formänderung des Stiftes und der Wurzel wird eine Erklärung hierfür gefunden.

III. Einfluß der Stiftform auf den Halt.

Wenn wir in den vorangegangenen Kapiteln über Länge und Stärke eines Stiftes sprachen, so haben wir dabei stillschweigend vorausgesetzt, daß es sich um einen zylindrischen Stift handle, für den diese beiden Größen ja auch die Hauptmerkmale sind. Im Nachstehenden sollen Formen beschrieben werden, die von dieser Zylinderform abweichen. Ein solcher ist der Konusstift.

Einen Konus charakterisieren wir durch den Flankenwinkel, d. i. der Winkel den eine Mantelgerade mit der Achse einschließt. Dieser Winkel kann alle Werte annehmen zwischen 0^0 und 90^0. Das bedeutet, daß die Grenzwerte ein Zylinder und eine plane Fläche sind. Da diese beiden Körper, wie ohne weiteres einleuchtet, sehr verschiedene spezifische Haftwerte haben, so dürfen wir auch den Haftwert eines Konusstiftes zwischen diesen beiden Extremen erwarten.

Versuchsanordnung: Ein zylindrischer Stift von 3 mm Durchmesser wird in einen Galalithkörper einzementiert und ausgezogen.

Zwei konische Stifte mit verschiedenen Flankenwinkeln werden in konische Bohrungen der Galalithscheiben eingesetzt. Der Trennungswiderstand wird ermittelt.

Zwei plane Teller, einer aus Galalith, der andere aus Stahl werden aufeinander zementiert und auf der Prüfmaschine getrennt.

Tabelle 4.

	Haftfläche mm²	Flanken-winkel	Haft kg	spez. Haft kg/mm²
Zylinder	94,0	0°	47,6	0,502
Konus 1	63,1	6°	31,4	0,465
Konus 2	32,0	11°	15,6	0,458
Fläche	78,5	90°	0,3	0,004

Wie wir erwarteten hat der Konus geringere Haftfestigkeit als der zylindrische Stift. Wie ist das zu erklären? Beim zylindrischen Stift haben wir zu berücksichtigen, daß die Kraft, die wir zur Trennung benötigen, sich aus zwei Komponenten zusammensetzt, einmal aus der Kraft, die den Bruch herbeiführt und einer Kraft, die die Reibung beim Ausziehen überwindet. Diesen Reibungswiderstand habe ich zu etwa 4 kg ermittelt. Wir können diese Kraft nämlich direkt an der Materialprüfmaschine ablesen, sobald wir die Sperrklinke herausnehmen. Es sinkt dann der Zeiger nach eingetretenem Bruch nicht sofort auf Null ab, sondern bleibt zunächst auf einer Kraft stehen, d. i. eben die zum Ausziehen notwendige. Um diese Reibungskraft muß die Haftfähigkeit eines Kegels naturgemäß kleiner sein. Die reduzierte Haftkraft des Zylinders, d. i. also die Trennungskraft weniger die Reibungskraft, wollen wir mit t bezeichnen; die Haftfähigkeit der ebenen Flächen mit e. Die Haft eines Kegels k muß sich also als Funktion des Flankenwinkels γ darstellen und die Grenzen t und e haben.

Die Formel lautet somit:

$$k_\gamma = t \cdot \cos\gamma + e \cdot \sin\gamma \qquad \text{(Gl. 7)}$$

k_γ = Haftfähigkeit eines Konus mit dem Winkel γ
t = reduzierte Haftfähigkeit eines Zylinders
e = Haftfähigkeit ebener Flächen
γ = Flankenwinkel des Konus.

Wenn wir uns vor Augen halten, daß e sehr klein ist und bei den in Betracht kommenden Konen der Flankenwinkel γ nahe 0 liegt, so können wir ruhig den ganzen Ausdruck e . sin γ wegfallen lassen. Damit vereinfacht sich die Formel 7 zu dem Ausdruck:

$$k_\gamma = t \cdot \cos \gamma \qquad \text{(Gl. 8)}$$

k stellt sich somit als Seite eines rechtwinkeligen Dreiecks dar mit der Hypothenuse t und dem Winkel γ.

Für die in Betracht kommenden kleinen Winkel ist der cos sehr nahe 1, für 6^0 beispielsweise 0,994. Wir sehen daraus, daß das Absinken der Haftfähigkeit bei schwach konischen Stiften gegenüber einem zylindrischen Stift in erster Linie auf das Fehlen der Gleitreibung zurückzuführen ist.

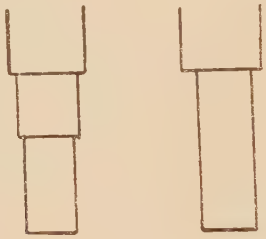

Abb. 8

Ein zweiter Vertreter einer nichtzylindrischen Stiftverankerung oder besser gesagt eine Variante des Zylinderstiftes ist der Stufenstift. Er stellt im Prinzip nichts anderes dar als eine Aneinanderfügung zylindrischer Stifte verschiedener Durchmesser. Je nachdem wir nun drei solcher Zylinder aufeinanderfügen oder nur zwei, haben wir den Hollmann'schen Stufenkern oder das Stufensystem nach Steinberg oder Pos u. a. vor uns. Diese Namen sind jedoch gerade mit der technologischen Seite der Stiftverankerungen so eng verknüpft, daß es unbillig wäre, sie hier lediglich unter dem Gesichtswinkel zu gebrauchen, den wir uns mit unseren Untersuchungen gestellt haben; wir wollen daher weiterhin lieber vom Ein- und Zweistufensystem reden. (Abb. 8).

Dem Einstufensystem ist übrigens auch die übliche Präparation für Metallunterbauten bei Jacketkronen zuzurechnen, die darin besteht, ein viereckiges Kästchen am oberen Ende der Stiftverankerungen aus der Wurzel auszuarbeiten. Es entsteht dann ein Wurzelstift, der sich aus einem Würfel und einem Zylinder zusammensetzt.

Denken wir uns einen Stufenstift auf Zug beansprucht, so müssen für ihn die Ueberlegungen des 1. Kapitels Geltung haben, nur müßten wir dabei jeden Zylinderteil für sich betrachten. Auf einen Versuch glaube ich verzichten zu können, da uns derselbe doch nichts neues bringen wird. Im übrigen wäre durch die Addition der verschiedenen Abschnitte der Vorgang so kompliziert, daß eine Analysierung des Versuchswertes sich kaum der Mühe lohnen dürfte.

Wir wollen deshalb lieber gleich zu dynamischen Versuchen übergehen. Zunächst der zentrale Schlag. Bei den Dauerversuchen habe ich mich mit je 3 Versuchsergebnissen begnügt.

Versuchsanordnung: Einstufen- und Zweistufenstift werden einzementiert und nach Erhärten mit einem Fallhammer von 200 gr Gewicht und 10 mm Fallhöhe zentral angeschlagen. Nach je 50 Schlägen wird der Halt geprüft, so lange, bis eine Kraft von ungefähr 5 kg zur Trennung genügt. Zum Vergleich wurde auch ein Zylinderstift von 3 mm Durchmesser und gleicher Länge mit den Stufenstiften angeschlagen.

Tabelle 5

	Haftfläche mm^2	Schlagzahl	spez. Schlagzahl mm^{-2}
Zylinderstift	84,4	2100	25,0
Einstufenstift	43,5	1450	33,4
Zweistufenstift	44,9	1533	34,0

Es zeigt sich also, daß die Stufenstifte einem Zylinderstift nicht unerheblich überlegen sind, während zwischen Ein- und Zweistufenstift kein nennenswerter Unterschied besteht.

Der Grund für die Ueberlegenheit der Stufenstifte ist ein zweifacher. Die in den Stift eingeleitete Perkussion wird sich als Schwingung über die ganze Stiftlänge fortpflanzen und zwar wird die Stärke der Schwingung nach der Tiefe hin abnehmen. Hat nun der Stift eine Ringfläche, ist er also ein Stufenstift, so wird er ein Großteil dieser aufgenommenen Schwingung mit der Ringfläche direkt an die Hülsenstufe abgeben. Der unterhalb der Stufe gelegene Teil des Stiftes wird also eine geringere Erschütterung erleiden als es der Fall wäre, wenn die Stifttreppe fehlte. Je näher die Ringfläche der Stelle ist, an der die Erschütterung eingeleitet wird, desto wirksamer muß sie nach obiger Betrachtung sein. Streng genommen könneten wir sonst einen Zylinderstift, der wie in unserer Versuchsanordnung mit seiner Unterfläche aufsitzt, auch als einen Stufenstift ansprechen, der nur als Eigentümlichkeit hat, daß die Stufe mit der Unterfläche zusammenfällt. Unter obigem Gesichtspunkt ist der Einstufenstift dem Zweistufenstift vorzuziehen, da bei ihm eine größere Ringfläche nahe der Krafteintrittstelle liegt.

Ein zweites Moment ist aber bei der Beurteilung noch zu berücksichtigen. Es ist eine bekannte Tatsache, daß der Kraftaufwand, der notwendig ist beispielsweise einen Stab abzubrechen, viel geringer ist, wenn eine Einkerbung erfolgte, wenn also gewissermaßen der Bruch bereits eingeleitet ist. Einen solchen Fall haben wir aber vor uns, sobald die oberen Randfasern der Zementschicht zerstört sind, es wird sich dann bei einem Zylinderstift leicht der Bruch nach unten fortsetzen. Anders ist es beim Stufenstift, hier wechselt die vorgeschriebene Bruchrichtung mehrmals. Der Bruch muß also jedesmal neu eingeleitet werden. Unter diesem Gesichtswinkel betrachtet ist der Zweistufenstift dem Einstufenstift und viel mehr noch dem Zylinderstift überlegen.

Wir wollen nun noch untersuchen, wie die Stifte sich verhalten, wenn wir die Schlagkraft nicht mehr in Richtung der Stiftachse, sondern senkrecht dazu einwirken lassen. Dr. Gerlach, Leipzig, beschreibt in der Zahnärztlichen Rundschau 1932 Heft 15 einen derartigen Versuch. Mich konnte jedoch der Versuch als Einzelversuch, wenigstens nach der gegebenen Beschreibung nicht restlos überzeugen. Ich habe ihn deshalb als Reihenversuch etwas modifiziert wiederholt.

Versuchsanordnung: Die einzementierten Stifte haben einen freien Hebelarm von 30 mm. Das Fallgewicht beträgt 100 gr, die Fallhöhe 200 mm. Die Einspannung erfolgte ohne elastische Polsterung, also starr, um die Schlagzahlen nicht noch künstlich zu erhöhen.

Tabelle 6

	Haftfläche mm^2	Schlagzahl	spez. Schlagzahl mm^{-2}
Zylinderstift	84,4	1583	18,8
Einstufenstift	43,5	1175*	27,0
Zweistufenstift	44,9	1218	27,2

Hier zeigt sich also wieder eine bedeutende Ueberlegenheit der Stufenstifte, die ihrerseits wieder einander gleichwertig sind. Dabei leuchtet jedoch nicht so ohne weiteres ein, wie die Ringflächen das Haftvermögen steigern können, da sie doch parallel zur einwirkenden Kraft liegen. Wir wollen uns deshalb einmal einen Stufenstift aus Gummi hergestellt vorstellen; mit dieser Vorstellung kommen wir meist am leichtesten zum Ziele, wenn wir auf Formänderungen eingehen wollen. Es ist sofort zu erkennen, daß der einseitig belastete Gummistift eine Deformation erleidet und zwar dergestalt, daß die gedrückte Seite, also die Seite nach der die Belastung zielt, eine Verkürzung erfährt. Dieser Verkürzung steht beim einzementierten Stift aber die Stufe entgegen. Mit andern Worten, es wird durch das Bestreben der Kraft den Stift zu verbiegen ein Druck durch die Ringfläche auf die Stufe im Wurzelbett übertragen. Damit wird aber ein Teil der Kraft, die beim Zylinderstift durch den Stift bzw. durch die Zementschicht aufgenommen werden muß, beim Stufenstift auf die Wurzel übergeleitet. Mit dieser Vorstellung ist die Ueberlegenheit der Stufenstifte ohne weiteres erklärt.

*) Mittel aus nur zwei Versuchen. Beim dritten Versuch brach bei 272 Schlägen der Stift ab.

Zur Form eines Stiftes im weitesten Sinne ist auch seine Oberflächenbeschaffenheit zu rechnen. Deren Einfluß ist indes geringer als man annehmen sollte, d. h. auch der glatte Stift wie er aus dem Zieheisen kommt weist für das Anhaften des Zementes noch genügende Rauhigkeit auf. Spanners Veröffentlichung entnehme ich beispielsweise:

a) glatte Stifte (Durchmesser 1,3 mm)	0,427 kg/mm²
b) mit Königswasser geätzte Stifte	0,503 kg/mm²
c) mit Sandstrahlgebläse gerauhte Stifte	0,515 kg/mm²

Zusammenfassung: Konische Stifte haben geringeren Halt als Zylinderstift. Dieses Zurückbleiben der Haftfähigkeit steht in gesetzmäßiger Abhängigkeit vom Flankenwinkel.

Die Stufenstifte weisen sowohl beim zentralen als auch beim seitlichen Dauerschlagversuch eine erhebliche Ueberlegenheit auf gegenüber einem Zylinderstift. Dagegen besteht bei den gleichen Versuchen zwischen Einstufenstift und Zweistufenstift kein nennenswerter Unterschied.

Der Oberflächenbeschaffenheit eines Stiftes kommt nach Spanner keine allzugroße Bedeutung zu.

IV. Einfluß der Zementzwischenschicht auf den Halt.

Es leuchtet wohl ohne weiteres ein, daß es für das Haftvermögen nicht belanglos sein kann, wieviel Spiel der Stift in seinem Bette hat oder mit anderen Worten wie stark die Zementzwischenschicht ist. Die meisten Autoren stimmen darin überein, daß der Stift möglichst genau in der Bohrung sitzen soll. Ob und inwieweit diese Forderung stimmt, soll im nachfolgenden Kapitel geprüft werden.

Versuchsanordnung: Stifte gleicher Länge und gleichen Durchmessers werden in Galalithscheiben einzementiert. Die Scheiben haben jedoch verschiedene Bohrungen, sodaß die Zementschicht verschieden stark ausfällt. Auf einer Materialprüfmaschine wird der zur Trennung nötige Zug gemessen.

Tabelle 7

Bohrung mm	Zementstärke mm	Haft kg
2,05	0,025	24,1
2,1	0,05	31,1
2,2	0,10	26,1
2,3	0,15	22,2
2,5	0,25	20,1
3,0	0,50	19,5

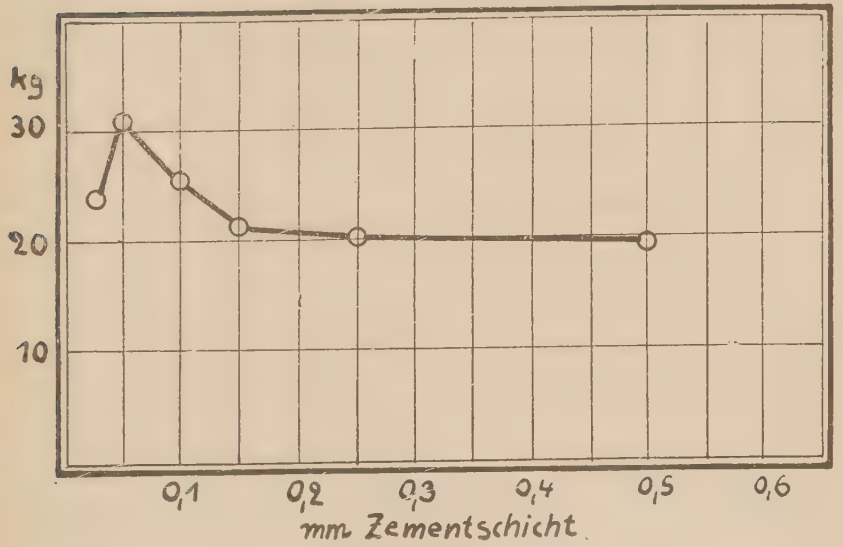

Abb. 9

Aus Tabelle und Schaubild können wir entnehmen, daß das Haftvermögen zunächst rasch zunimmt, im Maximum eine Spitze aufweist und sich dann einem Minimum nähert. (Abb. 9).

Diese Erscheinung erkläre ich mir folgendermaßen. Das Ansteigen der Haftfähigkeit ist dadurch bedingt, daß die Zementschicht erst von einer gewissen Stärke an voll wirksam werden kann. Wo nämlich der Spalt so klein geworden ist, daß kein

Zement mehr eingebracht werden kann, können wir von einem Einzementieren logischerweise überhaupt nicht mehr sprechen. Der Stift hält bestenfalls durch den Klemmsitz, den wir ihm geben. Die zu überwindende Kraft bei der Trennung ist dann die Reibung zwischen Stift und Wandung bedingt durch die elastische Spannung sowohl im Stift als auch in der Wandung.

Bei einer Zementstärke von 0,05 mm erreicht das Haftvermögen seinen optimalen Wert. Mit diesem Stiftspiel sollten wir also theoretisch unsere Stifte einsetzen. Bei dieser Stärke wirkt sich die volle Haftfähigkeit des Zementes aus, während der Zement rein auf Abscherung beansprucht ist. Vergrößern wir das Spiel, so tritt Beanspruchung der Zementfasern auch auf Zug ein. Gegen Zug ist Zement aber weniger widerstandsfähig; das Haftvermögen sinkt ab. Von einer gewissen Spaltstärke an wird sich die Zwischenschicht nicht mehr als Schicht auswirken, sondern einfach einen Zementklos darstellen. Damit ist nicht nur das Minimum sondern auch die Konstanz des Haftvermögens erreicht.

Der Vollständigkeit halber soll nun noch besprochen werden, welchen Einfluß die Beschaffenheit des Zementes auf den Halt hat. Wir können dazu abermals die schon erwähnte Arbeit von Spanner zitieren, der feststellte, daß die Klebrigkeit des frisch angerührten Zementes ohne Einfluß auf den Halt in erhärtetem Zustand ist. Ferner „mit normalhärtendem Zement erreicht man etwas höhere Festigkeiten als mit raschhärtendem, weil jener länger weich bleibt und deshalb besser in die Unebenheiten des Materials eindringt". Die Ueberlegenheit des normalhärtenden Zementes schwankt nach Spanners Versuchsergebnissen zwischen 6,5% und 30%, als Mittel errechnete ich rund 16%.

Zusammenfassung: Der Halt eines Stiftes nimmt zu bis zu einer Zementschichtstärke von 0,05 mm und von da an wieder ab. Praktisch müssen wir also bestrebt sein, das Stiftspiel klein zu halten. Normalhärtender Zement gibt höhere Festigkeiten als schnellhärtender.

Zum Schlusse ist es mir ein Bedürfnis Herrn Privatdozent Dr. med. et Dr. med. dent. Erwin Reichenbach bestens zu danken für die freundliche Ueberlassung des Themas und für die Uebernahme des Referates.

LITERATUR-VERZEICHNIS.

Gerlach Dr. H. P.: Porzellanmantelkronen über Metallaufbauten. Zahnärztl. Rundschau 1932 Nr. 15.

—, Metallaufbauten für Evekronen. Zahnärztl. Rundschau 1932 Nr. 18.

Kapp Dr. E.: Metallaufbauten für Evekronen. Zahnärztl. Rundschau 1932 Nr. 17.

Reichenbach Dr. E.: Praktische und kritische Beiträge zur keramischen Prothetik. Vierteljahresschrift f. Zahnheilkunde 1933 Heft 3.

Rothschild Dr. Albert: Unterbauten für Jacketkronen. Zahnärztl. Rundschau 1932 Nr. 10 und 11.

Spanner Dr. J.: Klebrigkeit und Haltfestigkeit von Zinkphosphatzement. Dtsch. Zahnärztl. Wochenschrift 1930 Nr. 23.

LEBENSLAUF.

Ich, Herbert Knöbl, bin geboren am 28. November 1901 in München als Sohn des Oberlehrers Johann Knöbl. Nach Absolvierung des Theresiengymnasiums in München, dessen Besuch mehrmals durch Waffendienst unterbrochen war, besuchte ich die Technische Hochschule München. Dort erwarb ich mir 1925 das Diplom als Maschineningeieur. Ich war dann bis 1931 in der Industrie tätig. Im Herbst 1931 wandte ich mich dem zahnärztlichen Studium an der Universität München zu, wo ich im Frühjahr 1934 meine Approbation als Zahnarzt erlangte.